

毛雪莲, 朱继田, 宋鹏, 等. 琼东南盆地深水区天然气水合物稳定域分布特征与预测[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(10): 58-63.

琼东南盆地深水区天然气水合物 稳定域分布特征与预测

毛雪莲, 朱继田, 宋鹏, 郭明刚, 黄时卓

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057)

摘 要:天然气水合物的形成与温度和压力密切相关, 低温高压稳定域直接决定了水合物的分布特征及展布规模。根据波诺马列夫经验公式, 依据琼东南盆地水合物稳定域形成的关键参数(天然气组分、地温梯度及水深等), 计算了琼东南盆地深水区水合物稳定域厚度, 并初步分析了水合物稳定域分布特征。研究表明: 水深(压力)越大、地温梯度越小, 水合物稳定域厚度越大, 当研究区水深达 334.1 m 时, 深水海底浅层即具备了形成甲烷水合物稳定域条件; 同时, 水合物稳定域分布整体上具有南北薄、中间厚, 自西向东逐渐变厚的趋势, 主体厚度分布介于 200~300 m, 最大厚度可达 400 m。

关键词:天然气水合物; 水合物稳定域; 波诺马列夫法; 琼东南盆地

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.086

0 引言

天然气水合物(以下简称水合物), 是在特定的低温高压条件下由天然气(主要为甲烷)和水形成的似冰状结晶化合物, 点火可燃烧, 故也称为“可燃冰”。水合物稳定域是指水合物形成所需温度、压力条件的热力学稳定范围的特定区域, 代表水合物形成的最大可能范围^[1-3], 主要与水深、海底温度、地温梯度 3 个参数有关。目前, 针对我国深水海域尤其是南海北部陆坡区水合物稳定域厚度的判识研究已取得众多成果。如方银霞等^[4]基于水合物稳定存在的温度-压力方程, 建立了水合物稳定域厚度几何算法以计算水合物稳定带厚度; 葛倩等^[5]以水合物稳定域底界的热力学温度及压力在三相平衡曲线中的表达为基础, 计算了中国南海区域水合物稳定域厚度; 许威等^[6-7]在 2010 年以甲烷水合物相平衡公式为基础, 计算分析了南海天然气水合物稳定域分布特征。前人对琼东南盆地区域的水合

物稳定域研究也取得了一些进展。何勇等^[8-9]根据琼东南盆地深水区的实际地温梯度和盐度条件, 分别计算 CO₂ 和 N₂ 在不同水深条件下的水合物稳定域厚度, 研究了非烃类气体对水合物稳定域厚度的影响。刘杰等^[10]利用热力学理论的 CSMHYD 程序, 分析了不同盐度、不同气体组分下稳定域的温压条件及其对甲烷水合物稳定域厚度及资源量的影响。总之, 前人采用不同方法从不同角度对南海海域深水区天然气水合物稳定域的研究成果, 对于水合物稳定域分布特征的预测评价等具有一定的参考意义^[11-12]。鉴此, 本文在前人研究的基础上, 应用波诺马列夫法, 对大量实验数据进行了回归整理, 得出不同相对密度天然气气源条件下水合物形成的经验公式, 并进一步对波诺马列夫经验公式进行推导, 计算了琼东南盆地深水区水合物稳定域厚度, 并初步分析和预测了水合物稳定域的展布特征。

1 区域地质背景

琼东南盆地位于南海海域西北部, 北靠海南隆起, 西临莺歌海盆地, 南与永乐隆起相接, 东接珠江口盆地, 是一个新生代大型拉张型沉积盆地。该盆地整体上呈 NE—SW 走向, 具有“多坳多隆”的构造格局^[13-14], 自北向南可分为 4 个一级构造单元和

收稿日期: 2021-04-08

资助项目: 中海石油(中国)有限公司综合科研项目“南海西部深水气藏开发技术及勘探新领域研究”(CNOOC-KJ135ZDXM38ZJ03ZJ)

作者简介: 毛雪莲(1986—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事南海西部深水沉积储层、天然气水合物方面的研究工作。E-mail: maoxl5@cnooc.com.cn

17 个二级构造单元(图 1)。其深水区(水深 ≥ 300 m)主要发育在中央坳陷带及其以南海域, 自西向东主要由乐东凹陷、陵水凹陷、陵南低凸起、北礁凹陷、松南低凸起、松南-宝岛凹陷、长昌凹陷组成, 最大水深达 3 200 m。琼东南盆地的形成演化经历了 4 个阶段: 始新世断陷阶段、渐新世拗断阶段、早中新世断拗阶段和中中新世—第四纪被动大陆边缘阶段^[15]。与 4 个演化阶段相对应, 琼东南盆地自下而

上发育了始新统领头组, 渐新统崖城组、陵水组, 新近系中新统三亚组、梅山组和黄流组, 上新统莺歌海组及第四系乐东组。研究区天然气水合物成矿条件优越, 深水区广泛分布第四纪发育的多期浊积扇、水道砂等富砂沉积物; 输导体系优越, 发育底辟、气烟囱、微裂隙等多种运移通道, 有利于深部烃源岩生成的热解成因气运移疏导至浅层天然气水合物稳定域中聚集形成水合物矿藏^[2,16-19]。

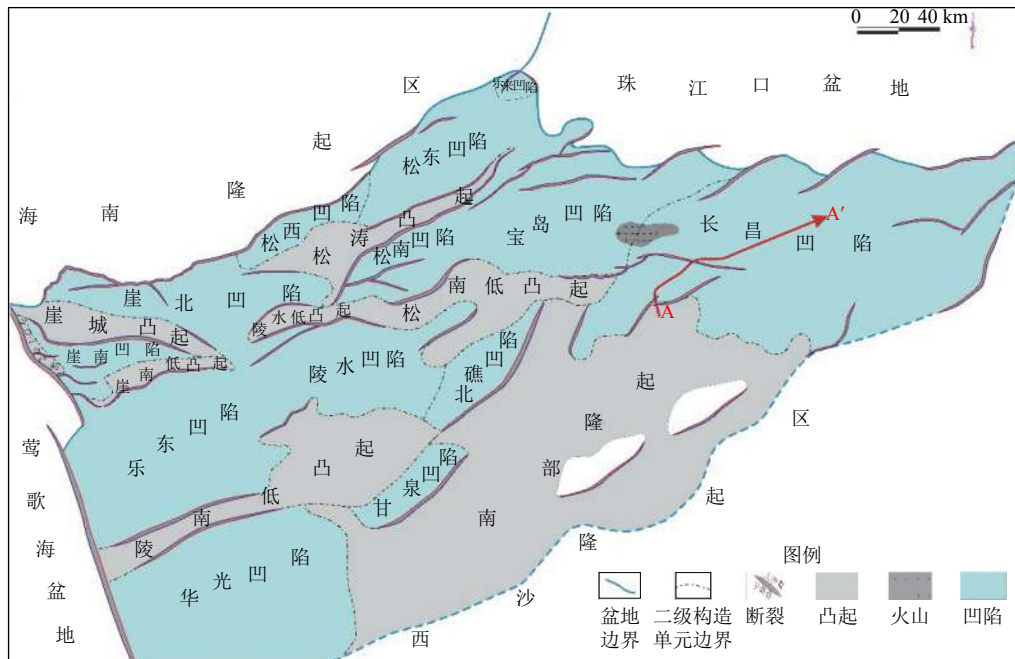


图 1 琼东南盆地构造单元区划图

Fig.1 Tectonic map of the Qiongdongnan Basin

2 计算方法

本文主要根据波诺马列夫法计算水合物稳定域厚度。该方法通过对大量实验数据进行回归整理, 得出烃类水合物形成的温度-压力关系方程, 该方程可转化为水合物和天然气的相态判断图版。通过图版, 可以对水合物的形成进行较为精准的简单预测, 计算误差最小, 结果最为精确, 且简单方便^[5]。而且, 该方法中的温度与压力的关系, 可以通过海底温度、地温梯度和压力系数换算成水深、地层厚度, 进而求得适合水合物发育的水深及地层厚度。

波诺马列夫经验公式一般表示为:

当温度 > 273.15 K 时, 压力-温度关系为:

$$\lg p = -1.0055 + 0.0541(B + T - 273.1) \quad (1)$$

当温度 < 273.15 K 时, 压力-温度关系为:

$$\lg p = -1.0055 + 0.0171(B1 - T + 273.1) \quad (2)$$

式中: T 为温度, K;

P 为水合物生成压力, MPa;

系数 B 、 $B1$ 为不同气体相对密度下的取值(表 1), 为常数。

此外, 压力与深度的关系为:

$$P = \rho_{sw} \times g \times (h_w + h) \quad (3)$$

式中: ρ_{sw} 为海水密度, 1 kg/m^3 ;

g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ;

h_w 为水深, m;

h 为地层厚度, 即稳定域厚度, m。

地温梯度计算公式:

$$T = \text{海底温度} + h \times G \quad (4)$$

式中: T 为求取的某点温度, $^{\circ}\text{C}$;

h 为稳定域厚度, m;

G 为地温梯度, $^{\circ}\text{C/m}$ 。

将公式(3)、(4)带入公式(1)中, 可得到如下公式:

表 1 研究区气源天然气相对密度下 B 与 B1 取值

Table 1 Values of B and B1 under different gas relative densities

相对密度/(g/cm ³)	B	B1
0.56	24.25	77.4
0.60	17.67	64.2
0.64	15.47	48.6
0.66	14.76	46.9
0.68	14.34	45.6
0.70	14.00	44.4
0.75	13.32	42.0
0.80	12.74	39.9
0.85	12.18	37.9
0.90	11.66	36.2
0.95	11.17	34.5
1.0	10.77	33.1

$$\lg(h_w + h) = 1.2197 + 0.0541 \times B + 0.0541 \times h \times G \quad (5)$$

通过推导后的公式(5),得到了水深、稳定带厚度、地温梯度以及相对密度(常数)的关系式,结合琼东南盆地海域范围的水深以及地温梯度等参数,即可对琼东南盆地深水区的水合物稳定域厚度进行计算。

通常情况下,温度>273.15 K,本文选择的甲烷水合物、陵水 X、陵水 Y 气田的气体相对密度分别为 0.56、0.60、0.64 g/cm³,带入(1)式计算后得到波诺马列夫曲线图版(图 2),也就是天然气水合物形成的温度-压力关系图。曲线代表天然气水合物形成的临界线,在曲线左侧为水合物形成的稳定区域,右侧为游离气区域,若与曲线重合,则认为是水合物稳定域的底界。同时,温度-压力关系可转化为深度-温度关系图版(图 3),结合水深、地温梯度可确定水合物稳定域底界深度、水合物稳定域厚度。A、B、C 三点为地温梯度曲线与不同相对密度下计算

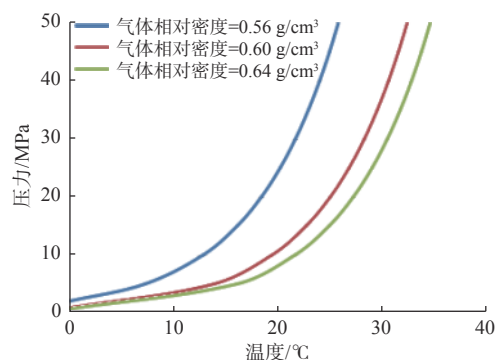


图 2 不同相对密度下波诺马列夫温度-压力曲线图版

Fig.2 Bono Malev's temperature-pressure curve plate under different relative densities

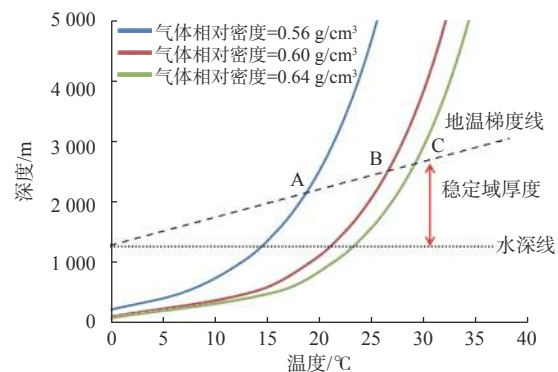


图 3 不同相对密度下波诺马列夫转换为深度-温度曲线图版

Fig.3 Bono Malev's depth-temperature curve plate under different relative densities

得到的波诺马列夫曲线的交点,该点所处的深度为水合物稳定域底界深度,该深度点与水深线的厚度差即为水合物稳定域厚度。

3 参数确定

根据波诺马列夫经验公式,通过推导得到式(5),在计算水合物稳定域厚度时,只须考虑气体相对密度、地温梯度、水深(压力)等参数。

(1) 气体相对密度

琼东南盆地已发现天然气水合物含有大量的热成因气,可能为深部崖城组烃源岩生成的天然气运移至浅层形成的水合物,其与周缘陵水 X、陵水 Y 气田为同一气源,因此,其天然气相对密度类比陵水 X 气田,取值为 0.6 g/cm³,海底温度为 2.8 °C。

(2) 地温梯度

根据前人研究,气烟囱区的地温梯度为 10 °C/100 m,气烟囱外围区水合物探井的地温梯度为 5~6 °C/100 m,琼东南盆地周缘地热探针测定的海底浅表层地温梯度为 8.5~12 °C/100 m^[20]。本次研究以“十二五”珠江口-琼东南盆地热流研究成果为基础(图 4),利用探井、地热探针数据进行修正,实现变地温梯度取值,更符合研究区实际地质情况。

(3) 压力

由于浅表层孔隙流体与海水连通,地层孔隙压力等于静水压力。

4 稳定域特征分析

利用波诺马列夫经验公式及上述参数取值,对琼东南盆地天然气水合物稳定域厚度进行计算,得

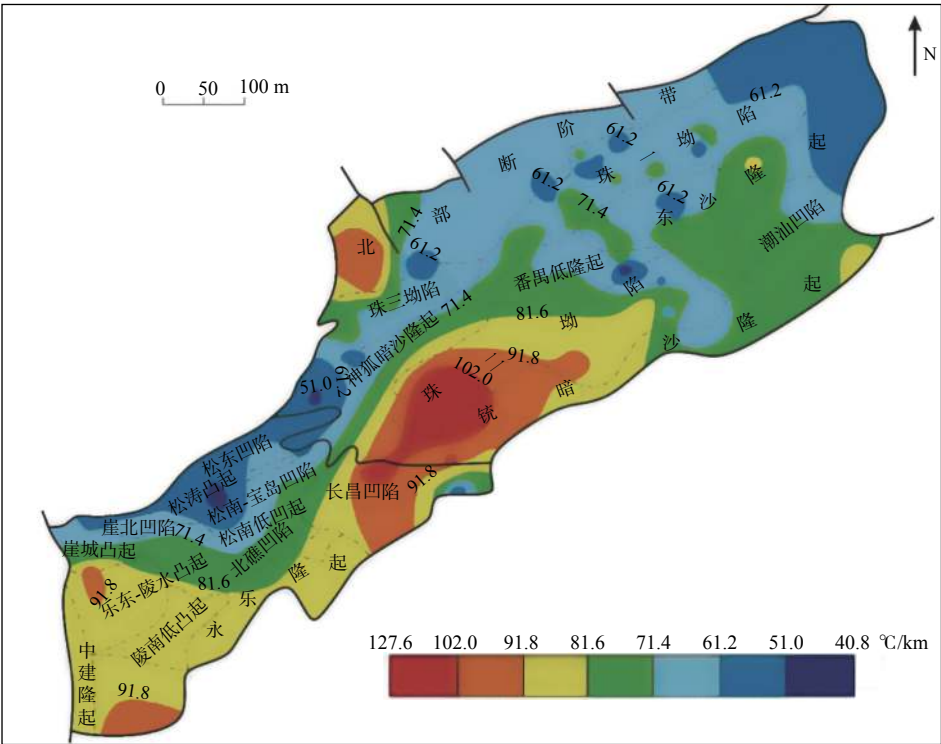


图 4 珠江口-琼东南盆地地温梯度分布图^[21]

Fig.4 Geothermal gradient distribution map of Pearl River Estuary and Qiongdongnan Basin^[21]

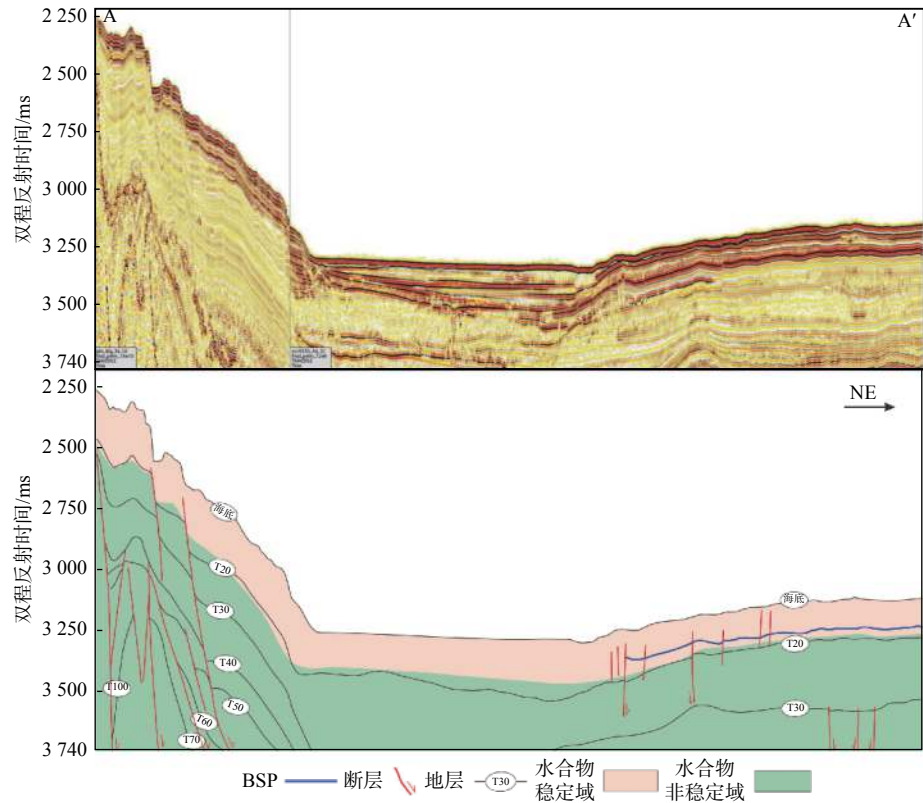


图 5 琼东南盆地水合物稳定域剖面及地震剖面示意图

Fig.5 The profile of hydrate stability zone in the Qiongdongnan Basin

到了研究区水合物稳定域剖面示意图及厚度等值线分布图(图 5、6),可以直观地了解研究区水合物

稳定域分布特征。

计算结果表明,琼东南盆地深水区具有有利于

水合物发育和赋存的温压条件。研究区水合物稳定域分布于 400 m 水深内,且稳定域厚度与水深、地温梯度关系非常密切,水深越大、地温梯度越小,水合物稳定域厚度越大,稳定域厚度等值线与水深线基本一致,且受地温梯度变化影响。从天然气水合稳定域剖面示意图(图 5)可以看出,稳定域底界基本平行于海底,稳定域厚度范围在海底以下 400 m 内,主要分布在乐东组和莺歌海组。在剖面上,在长昌凹陷内可以清晰识别出 BSR 反射,显示该区可能赋存天然气水合物。在平面上(图 6)显示,当琼

东南盆地水深达到 334.1 m 时才会海底地层中形成甲烷水合物稳定域,水深<334.1 m 的浅水区不具备甲烷水合物稳定赋存条件,稳定域厚度 0 m 线沿盆地北部坡折线延伸。整体来看,琼东南盆地水合物稳定域具有“南北薄、中间厚”的特征,北部坡折带和南部隆起区水合物稳定域厚度较薄,中央坳陷浅层海岸平原区水合物稳定域厚度较厚。中央坳陷水合物稳定域厚度由西向东逐渐变厚,在西沙海槽附近,高地温场背景下出现了局部异常低值,水合物稳定域厚度增厚,达 400 m,主体厚度为 200~320 m。

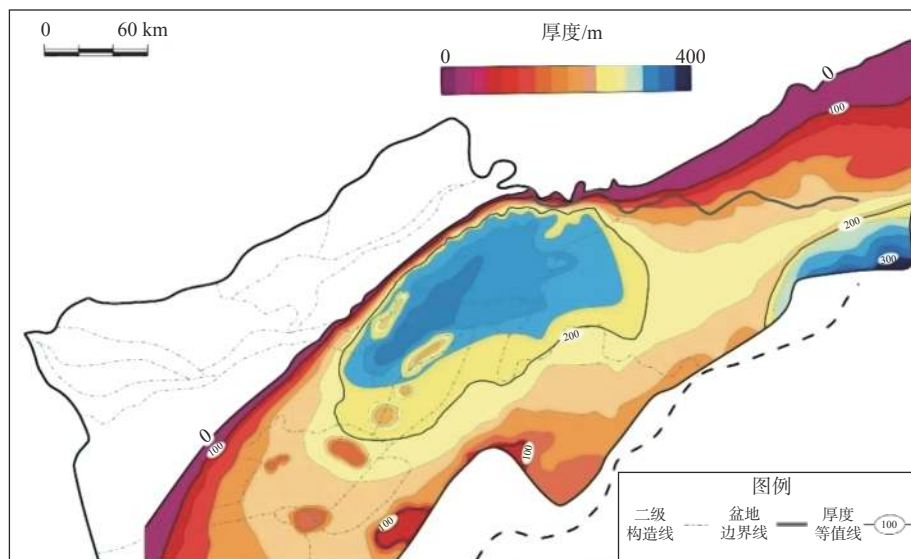


图 6 琼东南盆地天然气水合物稳定域厚度平面分布

Fig.6 Thickness map of gas hydrate stability zone in the Qiongdongnan Basin

5 结论

根据波诺马列夫经验公式,首次计算了琼东南盆地深水区不同水深、不同地温梯度条件下的水合物稳定域厚度,可以获得以下结论:

(1)琼东南盆地以水深 334.1 m 为临界,当水深>334.1 m 时,在海底地层中形成甲烷水合物稳定域;当水深<334.1 m 时,则不具备甲烷水合物形成的赋存条件。

(2)琼东南盆地水合物稳定域的展布具有南北薄、中间厚,自西向东逐渐增厚的特征,最大厚度可达 400 m,垂向上主要分布于乐东组和莺歌海组。

参考文献:

[1] 何家雄,马文宏,祝有海,等.南海北部边缘盆地天然气成因类型及运聚规律与勘探新领域[J].海洋地质前沿,2011,27(4): 1-10.
[2] 朱继田,邓勇,郭明刚,等.琼东南盆地盆地平原区天然气水合

物成矿条件及成藏模式[J].中国海上油气,2020,32(3): 10-19.

- [3] 杨睿,张媛,雷新华,等.南海北部天然气水合物赋存带识别与深度预测[J].海洋地质与第四纪地质,2011,31(4): 141-147.
[4] 方银霞,申屠海,金翔龙.冲绳海槽天然气水合物稳定带厚度的计算[J].矿床地质,2002,21(4): 414-418.
[5] 葛倩,王家生,向华,等.南海天然气水合物稳定带厚度及资源量估算[J].地球科学:中国地质大学学报,2006,31(2): 245-249.
[6] 许威,邱楠生,孙长宇,等.不同因素对天然气水合物稳定带厚度的影响[J].天然气地球科学,2010,21(3): 528-534.
[7] 许威,邱楠生,孙长宇,等.南海天然气水合物稳定带厚度分布特征[J].现代地质,2016,24(3): 467-473.
[8] 何勇,苏正,吴能友.非烃类气体对琼东南盆地深水区水合物稳定带厚度的影响[J].热带海洋学报,2012,31(5): 62-69.
[9] 何勇,苏正,吴能有.海底天然气水合物稳定带厚度的影响因素[J].海洋地质前沿,2012,28(5): 43-47.
[10] 刘杰,杨睿,邬黛黛,等.琼东南盆地华光凹陷天然气水合物稳定带厚度的影响因素[J].海洋学报,2019,41(8): 14-25.
[11] 徐浩,雷新华,李鹏飞,等.海域天然气水合物稳定带厚度域及影响因素的半定量研究[J].现代地质,2013,27(6): 1365-1372.
[12] 王淑红,宋海斌,颜文.天然气水合物稳定带的计算方法与参

- 数选择探讨[J]. 现代地质, 2015, 19(1): 101-107.
- [13] 朱伟林, 张功成, 高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 1-9.
- [14] 何家雄, 李福元, 王后金, 等. 南海北部大陆边缘深水盆地成因机制与油气资源效应[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(3): 1-11.
- [15] 周杰, 杨希冰, 杨金海, 等. 琼东南盆地松南低凸起古近系构造-沉积演化特征与天然气成藏[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2704-2716.
- [16] 梁永兴, 曾溅辉, 杨智峰, 等. 南海北部神狐海域输导体系特征及其对天然气水合物成藏的影响[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(4): 31-38.
- [17] 罗敏, 王宏斌, 杨胜雄, 等. 南海天然气水合物研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32: 56-69.
- [18] 梁金强, 王宏斌, 苏新, 等. 南海北部陆坡天然气水合物成藏条件及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(7): 128-135.
- [19] 龚跃华, 张光学, 郭依群, 等. 南海北部神狐西南海域天然气水合物成矿远景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(2): 98-103.
- [20] 徐行, 施小斌, 罗贤虎, 等. 南海西沙海槽地区的海底热流测量[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(4): 51-58.
- [21] 胡圣标, 龙祖烈, 朱俊章, 等. 南海北部深水区盆地构造-热演化[R]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2007.

PRELIMINARY STUDY ON THE DISTRIBUTION PATTERN OF GAS HYDRATE STABILITY ZONE IN THE DEEP-WATER AREAS OF QIONGDONGNAN BASIN

MAO Xuelian, ZHU Jitian, SONG Peng, GUO Minggang, HUANG Shizhuo

(Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, China)

Abstract: The formation and accumulation of gas hydrate are strictly depending on temperature and pressure, or so-called the stable region of low temperature and high pressure, which directly determines the distribution pattern and scale of the gas hydrate deposits. In this paper, according to Bono Malev's empirical formula, the hydrate stability zone of the deep-water areas of the Qiongdongnan Basin is calculated with three key parameters, namely the gas composition, the geothermal gradient and the water depth. Based on the distribution pattern of the hydrate stability zone of the Qiongdongnan Basin, it is found that the greater the water depth (pressure) and the smaller the geothermal gradient, the greater the hydrate stable thickness. When the water depth reaches 334.1 m, the hydrate stability zone is formed on the seabed. With regards to the general distribution pattern of the hydrate stability zone in the Qiongdongnan Basin, it is thin in the north and south, thick in the middle, and gradually becomes thicker from west to East. The thickness of the zone changes between 200~300 m with a maximum up to 400 m.

Key words: gas hydrate; hydrate stability zone; Bono Malev's method; Qiongdongnan Basin